



①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Patentschrift**  
⑩ **DE 198 61 160 C 1**

⑤① Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**F 16 C 33/12**

②

②① Aktenzeichen: 198 61 160.9-24  
②② Anmeldetag: 14. 1. 1998  
④③ Offenlegungstag: –  
④⑤ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 6. 12. 2001

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦③ Patentinhaber:  
Federal-Mogul Wiesbaden GmbH & Co. KG, 65201  
Wiesbaden, DE

⑦④ Vertreter:  
Fuchs, Mehler, Weiß, 65189 Wiesbaden

⑥② Teil aus: 198 01 074.5

⑦② Erfinder:  
Andler, Gerd, Dipl.-Ing., 60594 Frankfurt, DE

⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE 42 40 157 A1  
DE 10 63 343 C  
US 56 66 644 A  
EP 06 81 114 A2

⑤④ **Schichtverbundwerkstoff für Gleitelemente**

⑤⑦ Es wird ein Schichtverbundwerkstoff beschrieben, der für Lagerstellen geeignet ist, bei dem Mischreibung gegeben ist und der korrosionsbeständig und kalt umformbar ist sowie höchsten Belastungen Stand hält. Der Schichtverbundwerkstoff besitzt eine bleifreie Lagerlegierung, die auf Kupfer-Zink oder Kupfer-Aluminium basiert und einen heterogenen Gefügebau aufweist. Zwischen der Lagerlegierung (3) und dem Trägerwerkstoff (1) ist eine metallurgische Bindungszone (2) vorhanden, die 80-95% Eisen, übliche Verunreinigungen und als Rest Kupfer aufweist sowie kubisch kristallisiert ist.



100 µm

DE 198 61 160 C 1

DE 198 61 160 C 1

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf einen Schichtverbundwerkstoff gemäß den Merkmalen des Oberbegriffs des Patentanspruchs 1.

5 [0002] Allgemein dienen Lagerungen der Aufnahme und Weiterleitung von Kräften, und zwar sowohl der axialen wie auch radialen Kräfte zwischen sich relativ zueinander bewegenden Bauteilen. Dies bedeutet, daß für fast alle umlaufenden Drehbewegungen und Schwenkbewegungen Lager erforderlich sind. Lager sind somit ein in allen Maschinen und Aggregaten und damit insbesondere in Verbrennungsmotoren ein unverzichtbares Maschinenelement.

10 [0003] Betrachtet man bei modernen Verbrennungsmotoren die darin vorhandenen wichtigsten Lagerstellen (Hauptlager, Pleuellager, Kolbenbolzenbuchse, Nockenwellenbuchse u. a.), so erhält man einen guten Überblick über die Vielzahl oftmals konträrer Eigenschaften, die der Lagerwerkstoff erfüllen muß.

15 [0004] Je nach Lager- und Motorentyp sind nicht nur unterschiedliche konstruktive Gegebenheiten zu berücksichtigen, sondern es treten auch ganz unterschiedliche Belastungen (Gaskräfte, Massenkräfte, Gleitgeschwindigkeiten) auf. Für das hieraus resultierende vielseitige Anforderungsprofil (wie hohe Ermüdungsfestigkeit, hohe Verschleißfestigkeit, Freßunempfindlichkeit, hoher Korrosionswiderstand, hoher Kavitationswiderstand, u. a.) haben sich im Laufe der Zeit mehrschichtig aufgebaute Verbundwerkstoffe als besonders geeignet erwiesen. So gehören heute Zwei- bzw. Dreischichtverbundwerkstoffe zum Stand der Technik. Hierbei verleiht ein Stahlstützkörper dem Gleitlager die erforderliche mechanische Festigkeit und einen korrekten Festsitz im Gehäuse. Das Lagermetall, aufgebracht mittels Walzplattieren, Bandbiegen oder Sintern, erfüllt hierbei die bereits erwähnten Eigenschaften, wobei zusätzlich noch eine meist galvanisch aufgebraute Gleitschicht mit als Diffusionsbarriere dienender Zwischenschicht das Verbundsystem komplettiert.

20 [0005] Betrachtet man die Entwicklungstendenzen im Bereich von zukünftigen Dieselmotoren, so treten zwei Hauptanforderungen in den Vordergrund: Minimierung des Kraftstoffverbrauches und Reduzierung der Schadstoffemissionen.

25 [0006] Gegenüber konventionellen Dieselmotoren wird dies mittels Direkteinspritzung, d. h. Steigerung des Verbrennungsdrucks und durch Turboaufladung erreicht. Hierdurch werden in neuen Motorengenerationen besonders an die Lagerwerkstoffe höchste Anforderungen gestellt. Eindeutig geht der Trend zu immer höher belastbaren Werkstoffen, der bereits bei Pleuellagern zu neuen Schichtverbundwerkstoffen geführt hat. So ist in diesem Bereich das Sputterlager (die Laufschiene besteht aus einer mittels Kathodenzerstäubung aufgetragenen Gleitschicht) zu einem festen Marktbestandteil geworden. Mit diesem Lagertyp können höchste Belastungen ohne Probleme realisiert werden.

30 [0007] Aber auch in anderen Bereichen wie z. B. der Kolbenbolzenlagerung sind die Beanspruchungen an die Lagerwerkstoffe derart gestiegen, daß sie von den dort eingesetzten traditionellen Buchsenwerkstoffen auf Stahl/Bleibronze-Basis nur durch Erhöhung des Kolbenbolzendurchmessers und einer dadurch reduzierten spezifischen Belastung beherrscht werden. Diese Entwicklung weist jedoch in die falsche Richtung, weil hierdurch die oszillierenden Massen und damit die Bauhöhe des Motors anwachsen, was einer allgemein angestrebten Gewichtsreduzierung entgegenwirkt. Ein weiteres Problem bei der Verwendung der Bleibronzelegierungen ist ihre mangelnde Korrosionsbeständigkeit.

35 [0008] Hieraus wird deutlich, daß z. B. im Bereich von Buchsenwerkstoffen die zukünftigen Marktbedürfnisse nur durch ein neu zu entwickelndes Verbund-Werkstoffsystem erfüllt werden können. An dieses werden folgende technischen und wirtschaftlichen Anforderungen gestellt: Der Verbundwerkstoff muß höchsten Belastungen standhalten können, er muß eine hohe Korrosionsbeständigkeit bei Temperaturen bis 200°C in einer aggressiven Umgebung besitzen (Werkstoff stark beansprucht durch Öladditive, Verbrennungsrückstände im Öl und starke Kontamination des Öls infolge längerer Wartungsintervalle) und er muß kostengünstig herzustellen sein.

40 [0009] In der EP 0 681 114 wird ein Schichtverbundwerkstoff bestehend aus Stahl mit einem Gleitlagerwerkstoff aus einer Kupfer-Zink-Knetlegierung beschrieben, wie er als Lagerbuchsen- bzw. Anlaufscheibenwerkstoff Anwendung findet. Die Herstellung dieses Verbundwerkstoffs erfolgt mittels Walzplattierens. Eine sich an das Plattieren anschließende Wärmebehandlung erhöht als Folge von Diffusionsvorgängen die Bindefestigkeit zwischen Stahl und Lagermetall.

45 [0010] Bei diesem Verbundsystem handelt es sich bei der Herstellung, im Gegensatz zu dem in dieser Anmeldung beanspruchten Verfahren, um ein Walzplattierverfahren. Hierbei tritt als Folge des Walzdruckes eine mechanische Haftung durch Verzähnen der Oberflächen der beiden Werkstoffe ein. Eine nachfolgende Diffusionsglühung verstärkt zwar diese Bindung, führt aber nicht zu einer formschlüssigen Verbindung oder gar einer metallurgischen Bindung, wie dieses beim Begießen, also dem Kontakt einer flüssigen Phase mit einer festen Phase, der Fall ist.

50 [0011] Weiterhin muß festgestellt werden, daß der in der EP 0 681 114 beschriebene Prozeß auch hinsichtlich der Herstellungskosten teurer ist, als das hiermit verglichene Begießen, denn bevor der Verbundwerkstoff durch Walzplattieren hergestellt wird, muß das CuZn31Si-Band mittels eines eigenen Gießprozesses produziert werden. Erst in einem weiteren Arbeitsschritt kann durch Plattieren der Verbundwerkstoff entstehen. Beim Begießen von Stahl kann aber der Verbundwerkstoff in einem Arbeitsgang hergestellt werden.

55 [0012] Aus der DE-PS 10 63 343 ist ein Verfahren zum Bandgießen von Bleibronze bekannt, bei dem das Stahlband auf eine Temperatur von etwa 1100°C erwärmt wird, um ein Verziehen des Bandes zu verhindern. Zuvor wird das Band zu einem U-förmigen Profil mit abgewinkelten Rändern geformt.

60 [0013] Die DE 42 40 157 A1 beschreibt einen Synchronisiering. Auf den aus Eisen bestehenden Ringkörper wird mittels einer Spritzbeschichtung eine verschleißbeständige Messinglegierung aufgebracht, die Kupfer, Zink und wenigstens ein Element umfaßt, das aus der Gruppe ausgewählt ist, die aus Aluminium, Mn, Fe, Si, Ni, Co, Cr, Ti, Nb, V, Zr und Mo besteht. Die Anteile des Kupfers liegen bei 50 bis 80 Gew.-% und die des Zinks bei 20 bis 45 Gew.-%. Die Messinglegierung besitzt eine Struktur, die aus einer Matrix und aus einer intermetallischen Verbindung besteht, die härter als die Matrix ist. Die Matrixstruktur besteht aus einer  $\alpha$ - und  $\beta$ -Phase,  $\alpha$ - $\beta$ -Phase oder  $\alpha$ - $\beta$ - und  $\gamma$ -Phase.

65 [0014] Die US 5,666,644 beschreibt einen Mehrschichtlagerwerkstoff mit einer Stützschiene aus Stahl, einer Lagerschiene aus einer Kupferlegierung und einer Oberflächenschicht aus Zinn.

[0015] Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, einen Schichtverbundwerkstoff bereitzustellen, der für Lagerstellen geeignet ist, bei denen Mischreibung gegeben ist, und der korrosionsbeständig und kalt umformbar ist sowie höchste Be-

lastungen aushält.

**[0016]** Der Schichtverbundwerkstoff für Lagerschalen oder Lagerbuchsen ist dadurch gekennzeichnet, daß die Lagerlegierung bleifrei ist und auf Kupfer-Zink oder Kupfer-Aluminium basiert sowie einen heterogenen Gefügebau besitzt, wobei zwischen der Lagerlegierung und dem Trägerwerkstoff eine metallurgische Bindungszone vorhanden ist, die 80 bis 95% Eisen, übliche Verunreinigungen und als Rest Kupfer aufweist sowie kubisch kristallisiert ist.

**[0017]** Die Bestimmung der Legierungsbestandteile der Bindungsschicht wird vorteilhafterweise durch eine energie-dispersive Röntgenanalyse (EDX) mittels Rasterelektronenmikroskopie durchgeführt. Unter einer metallurgischen Bindungszone versteht man eine Bindezone, die sich infolge Diffusionsvorgängen von z. B. Elementen der aufgegossenen Legierung in den festen Trägerwerkstoff als deutlich erkennbare Zwischenschicht ausbildet. Meistens stellt sich diese Bindezone als Mischkristall oder intermetallische Phase beider Werkstoffe dar.

**[0018]** Der hohe Eisenanteil stammt aus dem Stahlträgerwerkstoff, während der Kupferanteil von der Lagerlegierung zur Verfügung gestellt wird. Außer diesen beiden Komponenten, die das Gefüge der metallurgischen Bindungszone bestimmen, können noch geringe Mengen der übrigen Legierungsbestandteile enthalten sein. Diese metallurgische Bindungszone gewährleistet eine hohe Haftfestigkeit und eine hohe Belastbarkeit des gesamten Schichtverbundwerkstoffes.

**[0019]** Die Dicke der Bindungszone liegt vorzugsweise im Bereich von 5 bis 50 µm.

**[0020]** Es hat sich gezeigt, daß die Anforderungen an den Schichtverbundwerkstoff durch hochfeste Kupferlegierungen erfüllt werden können. Hierzu zählen Sondermessing oder Aluminiumbronze, die, neben einer hohen Belastbarkeit, im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit den Vorteil bieten, kein Blei zu enthalten. Prinzipiell kann in dieser Werkstoffgruppe von zwei unterschiedlichen Gefügemorphologien ausgegangen werden: Legierungssysteme, die homogen erstarrten (z. B. CuAl8 bzw. CuZn31Si) und Legierungssysteme, die ein heterogenes Gefüge bilden (z. B. CuAl10Fe bzw. CuZn40Al).

**[0021]** Die "homogenen" Werkstoffe bestehen aus einer  $\alpha$ -Mischkristall-Struktur und weisen neben guten Gleiteigenschaften auch eine gute Kaltumformbarkeit auf. Demgegenüber haben die "heterogenen" Legierungen, begünstigt durch ihren mehrphasigen Gefügebau, höhere Verschleißbeständigkeit, aber schlechtere Kaltumformbarkeit.

**[0022]** Die Bindezone am Übergang zum Stahl besitzt eine ausreichende Duktilität, d. h. die Bildung von Sprödphasen am Übergang Stahl/Lagermetall wurde vermieden. Damit waren die Voraussetzungen für eine Weiterverarbeitung des Schichtverbundes als Band durch Umformprozesse wie Walzen oder Rollbiegen z. B. zur Herstellung einer Buchse erfüllt.

**[0023]** Der Schichtverbundwerkstoff läßt sich dadurch herstellen, daß der Trägerwerkstoff auf eine Temperatur von 1000°C bis 1100°C vorgewärmt wird, und eine sich heterogen ausbildende, bleifreie Lagerlegierung auf Kupfer-Zink- oder Kupfer-Aluminium-Basis mit einer Temperatur von 1000°C bis 1250°C aufgegossen wird, wobei der Schichtverbundwerkstoff innerhalb von 2 bis 4 Minuten von der Gießtemperatur der Lagerlegierung auf unter 100°C abgekühlt wird.

**[0024]** Die heterogene Struktur der Lagerlegierung wäre im Hinblick auf die Kaltumformbarkeit des Materials nachteilig. Es hat sich jedoch überraschend herausgestellt, daß die heterogene Struktur dann nicht nachteilig ist, wenn ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den  $\alpha$ - und  $\beta$ -Phasen vorliegt.

**[0025]** Die  $\beta$ -Phasen stellen sich bei hohen Temperaturen ein und müssen, um eine gute Umformbarkeit zu gewährleisten, u. a. in die  $\alpha$ -Phase umgewandelt werden. Andererseits müssen auch ausreichende Anteile der  $\beta$ -Phasen vorhanden sein, um die Heterogenität der Gefügestruktur zu erhalten, weil diese die Verschleißbeständigkeit vorteilhaft beeinflusst.

**[0026]** Die Umwandlung der  $\beta$ -Phasen kann durch die Abkühlung nach dem Aufgießen gesteuert werden, wobei jedoch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine möglichst schnelle Abkühlung wünschenswert wäre. Es hat sich herausgestellt, daß eine Abkühlung auf 100°C innerhalb von 2 bis 4 Minuten geeignet ist, um ein Verhältnis der  $\alpha$ - zu  $\beta$ -Phasen von 1,5 bis 3,0 einzustellen. Der Schichtverbundwerkstoff mit einem solchen  $\alpha$ - zu  $\beta$ -Verhältnis vereint gute tribologische Eigenschaften mit guter Umformbarkeit sowie mit guten Korrosionseigenschaften und hoher Belastbarkeit.

**[0027]** Durch den nachfolgenden Glühvorgang kann das Verhältnis der  $\alpha$ - zu  $\beta$ -Phasen auf bis zu 6 weiter angehoben werden, was sich günstig auf die Umformeigenschaften auswirkt.

**[0028]** Durch die Prozeßführung beim Begießen des Stahls ist es möglich, einen Verbundwerkstoff zu schaffen, der als Ganzes eine Umformung von mindestens 25% erlaubt.

**[0029]** Vorzugsweise wird der Schichtverbundwerkstoff für Gleitelemente, wie Gleitlager oder Buchsen, mit einer Dicke des Trägermaterials unter 10 mm verwendet.

**[0030]** Die Kupfer-Zink-Legierung kann beispielsweise folgende Zusammensetzung aufweisen:

Kupfer	55,0–63%
Aluminium	1,5–2,5%
Eisen	0,5–0,8%
Mangan	1,8–2,2%
Nickel	0,7–1%
Zinn	0,0–0,1%
Zink	Rest

**[0031]** Beispielhafte Zusammensetzungen einer Kupfer-Aluminium-Legierung sind wie folgt:

Aluminium	7,5–11%
Eisen	0,5–3%
Mangan	0,5–2%
Nickel	1,0–3,5%

Zink 0,0–0,5%  
Kupfer Rest

[0032] Der Schichtverbundwerkstoff kann zusätzlich noch eine Ternärschicht, beispielsweise aus PbSnCu oder einen Zinn-Flash als Einlaufschicht aufweisen.

[0033] Beispielhafte Ausführungsformen werden nachfolgend anhand der Zeichnungen näher erläutert:

[0034] Es zeigen:

[0035] Fig. 1 ein Schliffbild einer CuAl9Ni3Fe-Lagerlegierung im Gußzustand auf einem Trägerwerkstoff aus Stahl.

[0036] Fig. 2a u. 2b zwei Schliffbilder eines Schichtverbundwerkstoffes mit einer Lagerlegierung aus CuZn40Al1 im Gußzustand und

[0037] Fig. 3 ein Balkendiagramm zur Bindungsfestigkeit der Verbundwerkstoffe CuAl9Ni3Fe2 bzw. CuZn40Al2 auf Stahl im Gußzustand bzw. nach einer Wärmebehandlung im direkten Vergleich zu herkömmlichen Schichtverbundwerkstoffen.

#### Beispiel 1

##### CuAl9Ni3Fe

1,6 mm Stahlband

Gießplattieren des Stahlbandes

Abkühlung

Fräsen der Lagermetalloberfläche

Wärmebehandlung

Umformprozeß

Vorwärmtemperatur des Trägermaterials 1100°C,  
Schmelztemperatur der Lagerlegierung 1200°C  
in 30 sec auf Erstarrungstemperatur, in weiteren 2,5 min  
auf 100°C  
5–15% der Lagermetalldicke  
650°C, 6 h Haltezeit  
25%

[0038] Ein Schliffbild dieses Schichtverbundwerkstoffes im Gußzustand ist in der Fig. 1 zu sehen. Auf dem Trägerwerkstoff aus Stahl 1 befindet sich eine dünne Bindungszone 2, die 88% Eisen und 6% Kupfer aufweist, wobei die restlichen Bestandteile aus den übrigen Legierungsbestandteilen bestehen.

[0039] Auf der Bindungszone 2 befindet sich die Lagerlegierung 3, die eine heterogene dendritische Struktur aufweist, wobei die hellen Flächen die  $\alpha$ -Phase darstellen.  $\alpha$ - und  $\beta$ -Phasen liegen im Verhältnis 2,6 in der Lagerlegierung 3 vor.

#### Beispiel 2

##### CuZn40Al2

1,6 mm Stahlband

Gießplattieren des Stahlbandes

Abkühlung

Fräsen der Lagermetalloberfläche

Wärmebehandlung

Umformprozeß

Vorwärmtemperatur des Trägermaterials 1000°C,  
Schmelztemperatur der Lagerlegierung 1020°C  
in 30 sec auf Erstarrungstemperatur, in weiteren 2,5 min  
auf 100°C  
5–15% der Lagermetalldicke  
500°C, 4 h Haltezeit  
25%

[0040] In den Fig. 2a und 2b sind Schliffbilder des Schichtverbundwerkstoffes mit der Lagerlegierung aus CuZn40Al2 im Gießzustand dargestellt. Zwischen der Stahlträgerschicht 1' und dem Lagermaterial 3' befindet sich ebenfalls eine Bindungszone 2', die 81% Eisen und 8% Kupfer aufweist, wobei die restlichen Bestandteile aus den übrigen Legierungsbestandteilen bestehen.

[0041] Auch bei diesem Werkstoff zeigt sich eine heterogene Struktur.

[0042] In der Fig. 3 ist die Bindungsfestigkeit in N/mm<sup>2</sup> für Verbundwerkstoffe hergestellt nach Ausführungsbeispiel 1 bzw. 2 im Vergleich zu herkömmlichen Schichtverbundwerkstoffen dargestellt. Der graue Bereich kennzeichnet die Meßwertsteuerung. Hierbei wurde sowohl der Gußzustand für CuAl9Ni3Fe2 bzw. CuZn40Al2 wie auch der Zustand nach einer Glühung untersucht. Es ist deutlich erkennbar, daß die beiden neuen Verbundwerkstoffe hinsichtlich Haftfestigkeit den bekannten Stahlverbundwerkstoffen wie CuAl8 bzw. CuPb10Sn10 deutlich überlegen sind. Eine durchgeführte Wärmebehandlung, um den für eine spätere Umformung angestrebten Gefügebau einzustellen, wirkt sich nicht negativ auf die Haftfestigkeit aus (bei CuZn40Al2 auf Stahl wird die Haftfestigkeit sogar noch verbessert).

#### Patentansprüche

1. Schichtverbundwerkstoff für Gleitelemente, wie Lagerschalen oder Lagerbuchsen, mit einem Trägerwerkstoff aus Stahl und mit einer aufgegossenen Lagerlegierung, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Lagerlegierung bleifrei ist und auf Kupfer-Zink oder Kupfer-Aluminium basiert sowie einen heterogenen Gefügebau aufweist, wobei zwischen der Lagerlegierung (3, 3') und dem Trägerwerkstoff (1, 1') eine metallurgische Bindungszone (2, 2') vorhanden ist, die 80 bis 95% Eisen, übliche Verunreinigungen und als Rest Kupfer aufweist sowie kubisch kristalli-

siert ist.

2. Schichtverbundwerkstoff nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das heterogene Gefüge  $\alpha$ - und  $\beta$ -Phasen aufweist.
3. Schichtverbundwerkstoff nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß im Gußzustand nach dem Abkühlen und vor der Wärmebehandlung die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Phasen im Verhältnis von 1,5 bis 3,0 vorliegen.
4. Schichtverbundwerkstoff nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß nach dem Glühvorgang das Verhältnis der  $\alpha$ - zu  $\beta$ -Phasen auf bis zu 6 gesteigert ist.
5. Schichtverbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Bindungsschicht eine Dicke von 5–50  $\mu\text{m}$  aufweist.
6. Schichtverbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Lagerlegung folgende Zusammensetzung aufweist:

Kupfer	55,0–63%	
Aluminium	1,5–2,5%	
Eisen	0,5–0,8%	15
Mangan	1,8–2,2%	
Nickel	0,7–1,0%	
Zinn	0,0–0,1%	
Zink	Rest	20

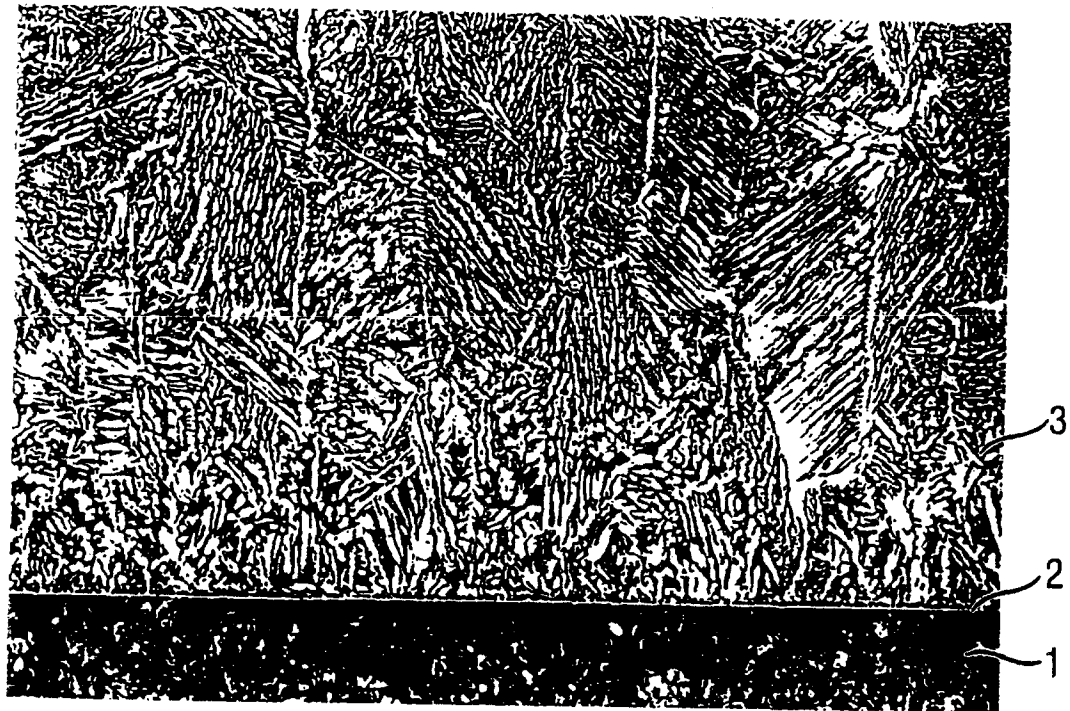
7. Schichtverbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Legierung folgende Zusammensetzung aufweist:

Kupfer	Rest	25
Aluminium	7,5–11,0%	
Eisen	0,5–3,0%	
Mangan	0,5–2,0%	
Nickel	1,0–3,5%	
Zink	0,0–0,5%	30

8. Schichtverbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß auf der aufgegossenen Lagerlegung eine Ternärschicht oder ein Zinn-Flash als Einlaufschicht aufgebracht ist.

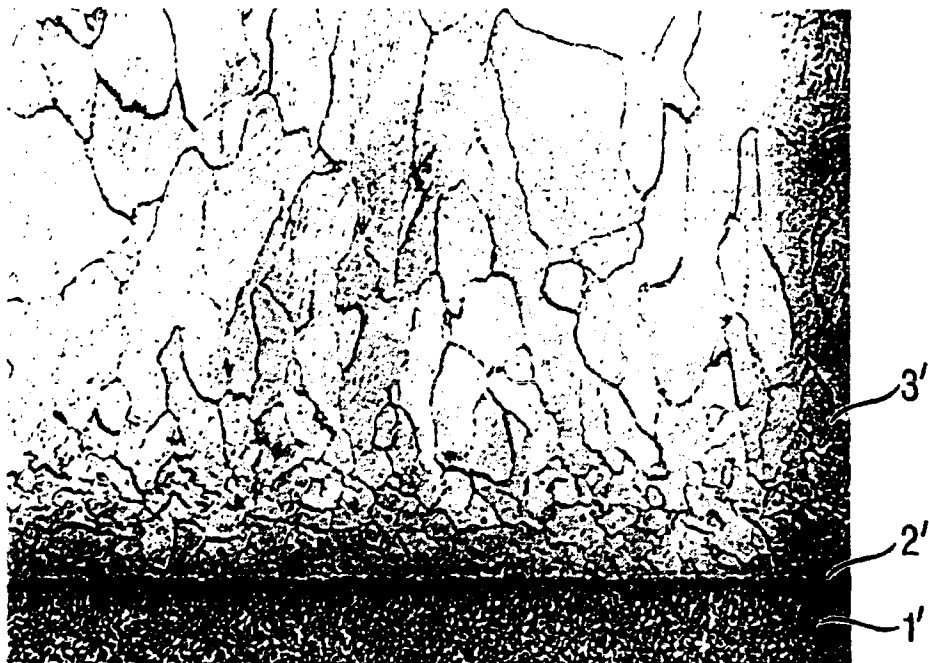
Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

***Fig. 1***



100  $\mu\text{m}$

**Fig. 2a**



CuZn40Al  
Gußzustand

100 µm

**Fig. 2b**



CuZn40Al  
Gußzustand

10 µm

**Fig. 3**

